

Таким образом, предлагаемый способ охраны выработки дает возможность применять жесткие сооружения при слабых почвах, тем самым расширяя область их применения. На моделях из эквивалентных материалов были определены его основные параметры, и эффективность по сравнению с традиционным способом охраны.

#### Список литературы

1. Моделирование проявлений горного давления / Кузнецов Г.Н., Будько М.Н., Васильев Ю.И., Шклярский М.Ф., Юревич Г.Г. – Л.: Недра, 1968. – 280 с.
2. Требования по технике и методике моделирования методом эквивалентных материалов: Утв. Техн. упр. МУП СССР 27.12.72. / М-во угольной промышленности СССР, ВНИМИ. – Л., 1973. – 56 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Роєнком А.М.  
Надійшла до редакції 31.03.10*

УДК 622.261.27

© С.Н. Гапеев, В.В. Раскидкин, К.В. Кравченко

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ВЫРАБОТОК НА УЧАСТКЕ ИХ СОПРЯЖЕНИЯ

Представлены результаты компьютерного моделирования сопряжения двух протяженных выработок. Показан характер изменения напряженно-деформированного состояния породного массива по мере приближения одной выработки к другой. Установлены количественные показатели взаимного влияния выработок при их пересечении.

Представлені результати комп'ютерного моделювання сполучень двох протяжних виробок. Показаний характер зміни напружено-деформованого стану породного масиву при зближенні однієї виробки з другою. Встановлені кількісні показники взаємного впливу виробок під час їх перетинання.

The results of computer simulation of the pairing of two extended workings are presented. Showed the character of the stress-strain state of rock mass as it approaches the one making the other. The quantitative indicators of mutual influence of workings at their intersection are defined.

**Введение.** Угольная промышленность остается важнейшей составляющей топливно-энергетического комплекса Украины. Значительные запасы угля, развитая инфраструктура регионов, высококвалифицированные кадры позволяют обеспечить энергетическую безопасность государства. Кроме тепло- и электроэнергетики одной из наиболее важных отраслей является металлургия, в которой незаменим основной компонент коксохимического производства – уголь.

Добыча коксующегося угля в Украине сосредоточена на шахтах Центрального района Донбасса, который характеризуется большими глубинами ведения горных работ, сложными горно-геологическими условиями.

Как показывает опыт ведения горных работ на шахте им. В.М. Бажанова, применение мер охраны и поддержания капитальных выработок не снимает задачи обеспечения их устойчивости: наблюдается пучение пород почвы, что тре-

бует проведения неоднократных подрывов вспученных пород с привлечением на эти работы значительных людских, материальных и финансовых ресурсов.

Таким образом, применяемых способов охраны таких выработок для обеспечения их устойчивости оказывается явно недостаточно. Поэтому разработка эффективного способа обеспечения долговременной устойчивости капитальных выработок, пройденных в сложных горно-геологических условиях, является актуальной технической задачей.

Представление о взаимодействии системы «крепь-породный массив» можно получить, рассмотрев НДС породного массива в окрестности выработки.

Применение компьютерной техники на стадии обоснования технологических параметров позволяет подвергнуть детальному анализу различные варианты реализации исследуемого объекта.

Усложнение физических моделей, лежащих в основе решения задачи о напряженно-деформированном состоянии породного массива, преследует цель достижения наибольшей адекватности аналитических результатов натурным измерениям.

Математические трудности, возникающие при этом в связи с усложнениями модели, в известной мере могут быть устранены путем применения численных методов. Таких, например, как метод конечных или граничных элементов, которые все шире используются для исследования упругопластического состояния породного массива, содержащего горную выработку, особенно в последние годы, в связи бурным развитием ЭВМ.

Корректное применение численных методов для решения задач геомеханики возможно в случае, если численная модель наиболее полно отражает свойства исследуемой природы. В частности таким условием является применение упругопластических моделей среды. При этом важным является их удобство с точки зрения реализации в виде численного решения на ЭВМ.

Применительно к данным исследованиям наиболее эффективен метод конечных элементов (МКЭ), поскольку он позволяет легко моделировать самые различные неоднородности среды: слоистость, трещиноватость, анизотропию свойств пород, явления фильтрации. Разработаны специальные приемы для моделирования взаимодействия крепи выработки с окружающим массивом. Сколько угодно сложный вырез в полуплоскости, а также конечное число таких вырезов, не являются препятствием к применению метода.

Аппарат МКЭ применим не только к решению двумерных (плоских) задач теории упругости. Пространственная область массива также может быть аппроксимирована конечными элементами, но уже не треугольными, а, например, тетраэдрическими. Естественно, математический аппарат метода и его реализация на ЭВМ при этом существенно усложняется. Поэтому решения для трехмерных областей, полученные на настоящий момент, весьма немногочисленны.

Отметим также возможность получения МКЭ решений в нелинейной постановке, т.е. в предположении, что среда деформируется неупруго, допускает пластические деформации или хрупкое разрушение. Используя вычислительные возможности метода, нелинейное решение получают как последовательность упругих решений.

**Целью статьи является** представление результатов численного моделирования методом конечных элементов пересечения двух протяженных выработок и оценка их взаимного влияния по мере приближения друг к другу.

**Изложение основного материала.** Центральный вспомогательный уклон (ЦВУ) гор. 1100 м представляет собой наклонную выработку, обслуживающую горные работы на горизонте откатки и нижележащих горизонтах. Таким образом, всю выработку по длине можно разбить на несколько участков, для которых подходы к обеспечению устойчивости различны принципиально в силу особенностей их работы. Причем устойчивость выработки в целом складывается из устойчивости этих отдельных, разных по своим условиям работы, участков.

Первая группа – это протяженные участки выработки. Для них правомочны подходы и методы исследований напряженно-деформированного состояния геомеханической системы «выработка-породный массив», присущие для одиночных выработок, расположенных вне зоны влияния очистных работ. То есть, все численные исследования устойчивости в этом случае можно проводить в плоской постановке задач, поскольку условия применимости плоских расчетных схем структурного анализа при использовании метода конечных элементов в этом случае соблюдены.

Вторая группа – это участки сопряжений уклона с заездами на горизонтальные выработки (штреки). Такую конфигурацию указанной геомеханической системы, вообще говоря, нельзя рассматривать в плоской постановке, поскольку любое сечение не будет идентичным любому другому рядом расположенному сечению (условия применимости плоской расчетной схемы не соблюдаются). Следовательно, корректно рассматривать напряженно-деформированное состояние участка сопряжения допустимо только на объемной модели и при соответствующей объемной расчетной схеме.

Вместе с тем, рассмотрение участков сопряжений на плоских моделях также возможно, при условии, что особенности распределения напряжений и деформаций на сопряжении введены в расчет с достаточной для инженерных расчетов точностью при помощи соответствующих коэффициентов, учитывающих возмущающее действие полей напряжений вокруг выработки подходящей на напряженно-деформированное состояние основной.

В данной работе рассмотрена вторая группа участков, при этом применены плоские модели, для чего соблюдены все вышеперечисленные условия. Целью численных решений являлось исследование напряженно-деформируемого состояния (НДС) породного массива в окрестности сопряжения выработок, при изменении расстояния между сопрягающимися выработками.

Задача решалась в плоской упругой постановке. Анализировалось НДС однородного массива, вмещающего сопряжение двух выработок арочной формы с размерами каждой: ширина – 5.82 м, высота – 3.96 м.

Чтобы исключить влияние краевых эффектов, размеры исследуемой области массива принимались достаточно большими относительно размеров выработок – 95.34 м x 63.67 м. Нагрузка, приложенная к границам модели, соответствовала глубине расположения объекта исследований – 1100 м, и составляла  $\gamma H = 27$  МПа. Физико-механические свойства породного массива в модели задавались такими, как представлены в табл. 1.

Выработки проводились последовательно и пересекались под углом 90 градусов, в одной горизонтальной плоскости. Фиксирование НДС массива осуществлялось по мере сокращения расстояния породного целика между выработками. Направления, в которых выполнялся контроль, представлены на рис.1 и пронумерованы соответствующими осями.

Таблица 1

Физико-механические свойства пород в численной модели

Порода	песчанистый сланец
Объемный вес, $\gamma$	2,4 т/м <sup>3</sup>
Прочность на сжатие, $R_c$	40,0 МПа
Прочность на растяжение, $R_p$	4,0 МПа
Модуль упругости, $E$	2,78*10 <sup>8</sup> МПа
Коэффициент Пуассона, $\mu$	0,21

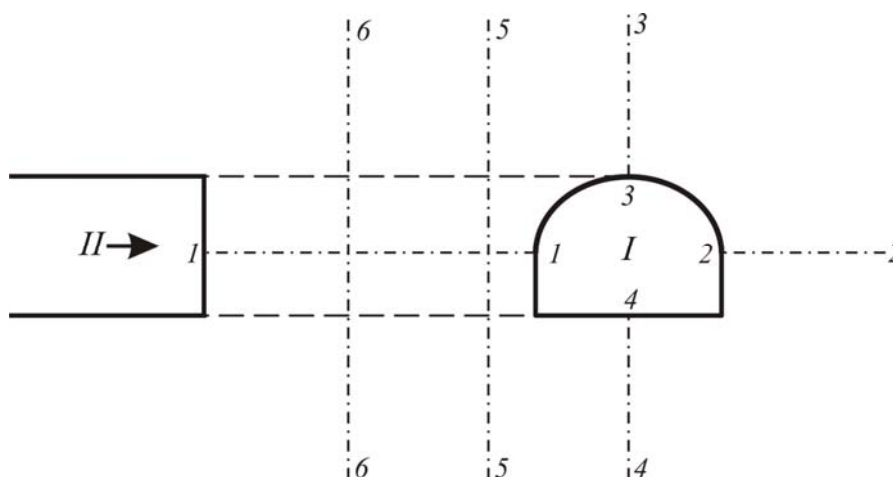


Рис. 1. Схема направлений контролирования НДС при численном моделировании: 1 – 1 ... 6 – 6 – оси, в направлении которых выполнялся контроль НДС; I – горная выработка, которая неподвижна; II – горная выработка, которая приближается

На первом этапе решения задачи рассматривалось НДС породного массива в окрестности одиночной горной выработки. Результаты в виде картины распределения эквивалентных напряжений представлены на рис. 2.

Следующим шагом решения было моделирование постепенного приближения второй выработки, при этом расстояние между приближающейся и неподвижной выработкой пошагово сокращалось с целью определения максимального расстояния начала взаимного влияния выработок.

На начало второго этапа расчетов расстояние между выработками было таким, что взаимное влияние отсутствовало (рис. 3,а). Далее выполнялось решение ряда численных задач, по мере нарастания числа которых сокращалось расстояние между выработками. Расчеты завершились при расстоянии между выработками (при ширине целика между ними), равном 2,6 м.

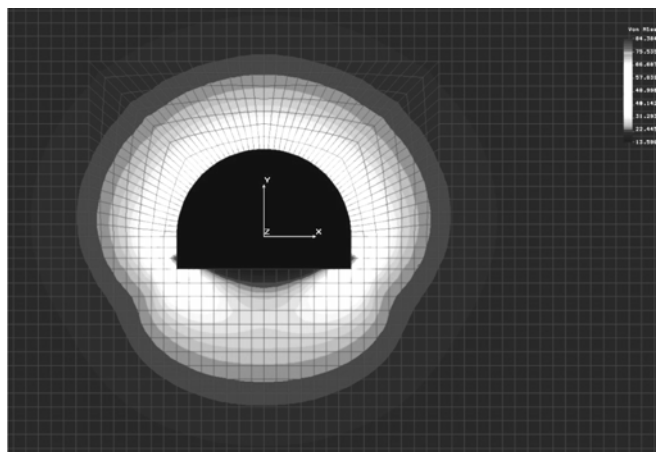


Рис.2. Распределения эквивалентных напряжений в окрестности одиночной выработки

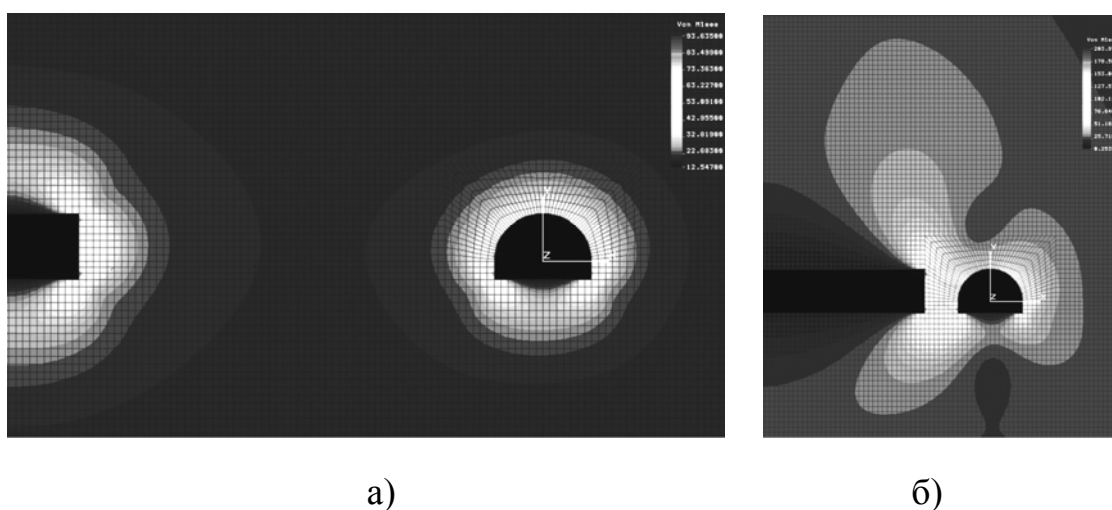


Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений в окрестности сопряжения выработок при расстоянии между ними: а) 11,3 м; б) 2,6 м

В ходе выполнения расчетов контролировались картины распределения эквивалентных напряжений, определяемых по формуле, предложенной научной школой кафедры строительства и геомеханики Национального горного университета:

$$\sigma_e = \frac{(\psi - 1)(\sigma_1 + \sigma_3) + \sqrt{(\psi - 1)^2(\sigma_1 + \sigma_3)^2 + 4\psi(\sigma_1 - \sigma_3)^2}}{2\psi}, \quad (1)$$

где  $\sigma_1, \sigma_3$  – главные максимальное и минимальное напряжения;  $\psi = \frac{R_p}{R_c}$  – коэффициент хрупкости.

В численном расчете к категории разрушенных элементов, составляющих ЗНД, относились те элементы, в которых после расчета выполнялось следующее условие прочности

$$\sigma_e \geq R_c \cdot k_c, \quad (2)$$

где  $k_c$  – коэффициент структурно-механического ослабления породного массива, отражающий масштабный эффект при переходе от прочности породы в образце к прочности породы в массиве. В данных расчетах принимался равным 0,5, то соответствует параметрам трещиноватости пород в районе ЦВУ.

Результаты моделирования представлены на графиках (рис. 4-5). Анализ результатов показывает следующее.

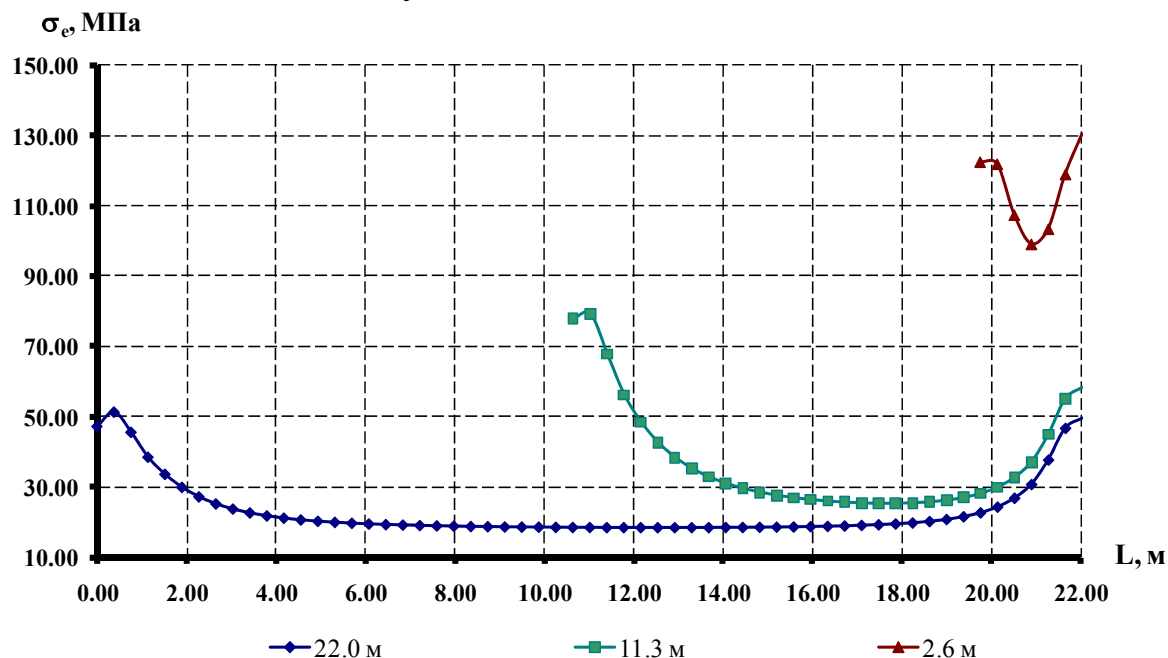


Рис. 4. Изменение величины эквивалентных напряжений в целике между выработками (направление 1-1)

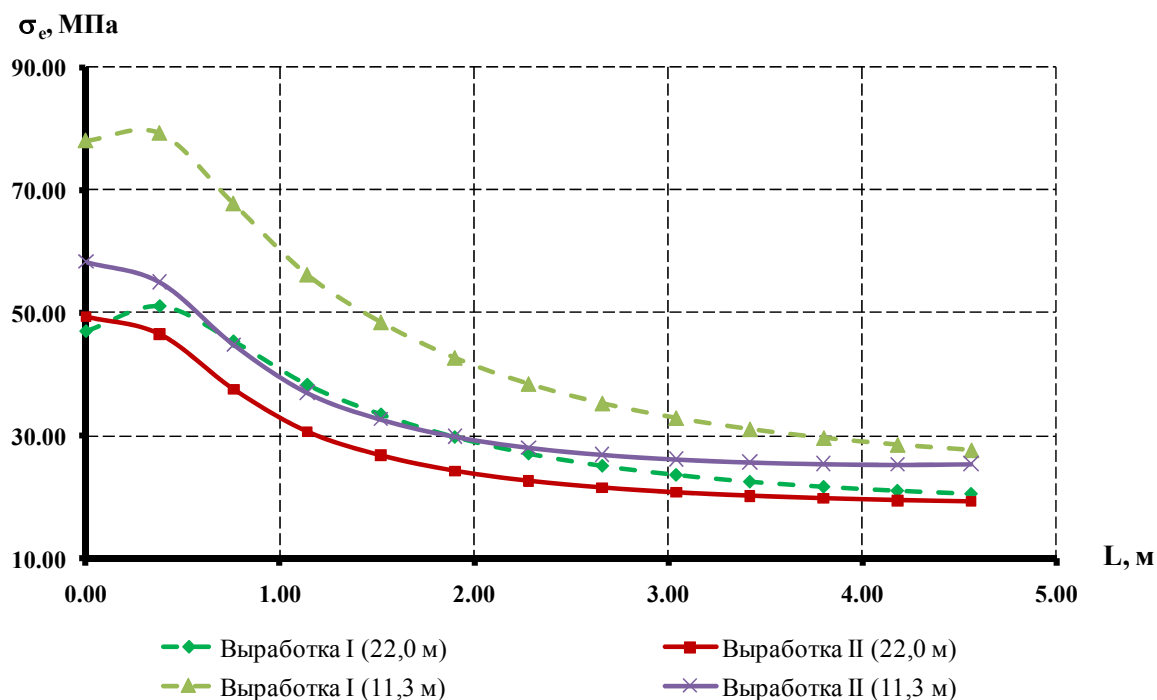


Рис. 5. Изменение величины эквивалентных напряжений в приконтурной зоне выработок (направление 1-1) при расстоянии между ними 22,0 м

На картинах распределения напряжений в целике между выработками (рис. 4), полученных в направлении 1-1 (см. рис. 1), при расстоянии между выработками 22,0 м и 11,3 м, т.е. достаточно большом, несложно выделить две зоны с различным характером распределения напряжений – приконтурные зоны от контура выработок вглубь массива на расстояние порядка 5,0 м и зона в теле целика на расстояниях, превышающих 5,0 м.

При расстоянии между выработками 22,0 м, когда влияние выработок друг на друга не сказывается, как это видно на рис. 4, величины эквивалентных напряжений как возле стоящей выработки I, так и возле подходящей выработки II практически равны – разница значений на контурах выработок не превышает 2,0 МПа (менее 4%). На рис. 5 представлены графики только для этих приконтурных зон.

По мере приближения выработок друг к другу общая напряженность массива между выработками возрастает (рис. 4, 5): максимумы эквивалентных напряжений на контуре обеих выработок возрастают в 1,7 и 1,2 раза для выработки I и II соответственно. Минимумы, на расстоянии 4,56 м от контура, возрастают для обоих случаев в 1,3 раза.

Т.е., концентрация напряжений при сближении выработок сказывается больше на подходящей выработке, чем на неподвижной.

Зависимости на рис. 5 с коэффициентом корреляции 0,99 аппроксимируются функциями вида

$$\sigma_e = a - be^{-cL^d}, \quad (3)$$

где  $L$  – расстояние между выработками, м.

Зависимости (3) справедливы для приконтурной зоны глубиной не более 5,0 м. Коэффициенты аппроксимации представлены в таблице 1.

Таблица 1

Выработка	Коэффициенты корреляции			
	a	b	c	d
Выработка I (22,0 м)	51,6	36,2	1,22	-1,37
Выработка II (22,0 м)	47,7	30,5	0,72	-1,58
Выработка I (11,3 м)	80,5	62,5	1,12	-1,27
Выработка II (11,3 м)	55,8	32,3	0,68	-1,78

Величины эквивалентных напряжений в приконтурной зоне на глубину 4,5 м превышают значение  $R_c k_c$  для рассматриваемой породы, при этом на участке массива свыше 4,5 м массив остается не разрушенным. Т.е. при расстоянии 22,0 м область разрыхления распространяется на эту глубину. При расстоянии 11,3 м область разрушения охватывает уже все пространство между выработками, поскольку условие (2) выполняется для всех конечных элементов, расположенных между выработками.

**Выводы.** Проведенное численное моделирование показало, что при приближении одной выработки к другой большему влиянию подвержена та выработка, которая приближается. При этом зона активного влияния при таких размерах выработок распространяется на расстояние до 4,5 м и сохраняется вплоть до сближения выработок на расстояние до 11,0 м. При меньшем расстоянии уровень напряжений выравнивается и остается высоким во всей толще целика, что указывает на его разрушение. Зона 4,5 м является той зоной, на которую должно быть направлено максимальное влияние с точки зрения управления устойчивостью сопряжений, причем управляющие воздействия должны применяться, когда выработки находятся на расстоянии, превышающем 11,0 м.

Дальнейшие исследования направлены на оценку взаимного влияния выработок, расположенных в слоистом массиве, с целью разработки методов повышения устойчивости таких сопряжений, эксплуатирующихся на больших глубинах.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Сдвіжковою О.А.  
Надійшла до редакції 02.04.10*

УДК 519.6; 622.235.5

© А.В. Чернай, А.К. Ищенко, Н.Н. Налисько, А.Л. Кириченко

## **МЕТОД КРУПНЫХ ЧАСТИЦ В МЕХАНИКЕ ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД**

Запропонована модифікація схеми чисельного розрахунку рівнянь гідродинаміки за методом великих частинок для розв'язання задач вибухового навантаження гетерогенних конденсованих середовищ.

Предложена модификация схемы численного расчета уравнений гидродинамики по методу крупных частиц для решения задач взрывного разрушения гетерогенных конденсированных сред.

Modification of chart of numeral calculation of hydrodynamics equations is offered on the method of large particles for the decision of tasks of explosive destruction of the heterogeneous condensed environments.

Эффективность добычи полезных ископаемых открытым и подземным способами в основном определяется этапом буровзрывных работ. Поэтому поиск рациональных параметров конструкции зарядов был и остается актуальным, как с научной точки зрения, так и производственной необходимости. Решение этой проблемы является сложной научно-технической задачей, решение которой затруднено в связи с ее многофакторностью, недостатком достоверных знаний о проведении гетерогенных сред в условиях динамического воздействия, принципиальным запретом на получение автомоделных решений и моделирования в целом. Поэтому исследования ограничиваются теоретическими расчетами с последующим их сравнением с фактическими результатами работы взрыва.